5. 地電阻影像技術於土壤含水量監測之應用

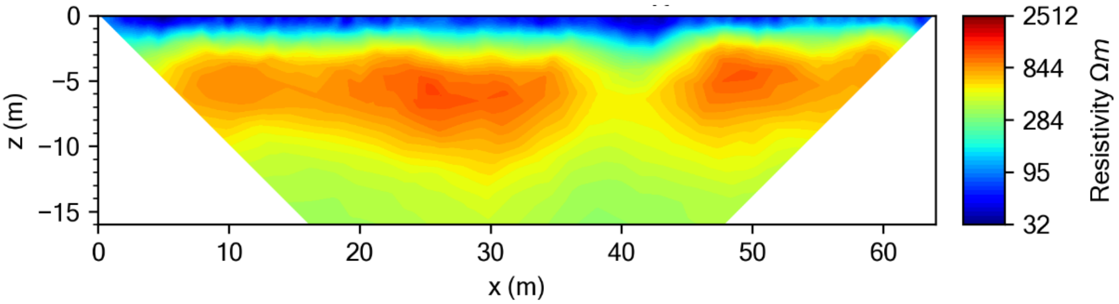
農業部農業試驗所農業化學組/劉滄棽/研究員兼組長

5.1 地電阻影像 (ERT) 與自然電位 (SP) 觀測技術簡介

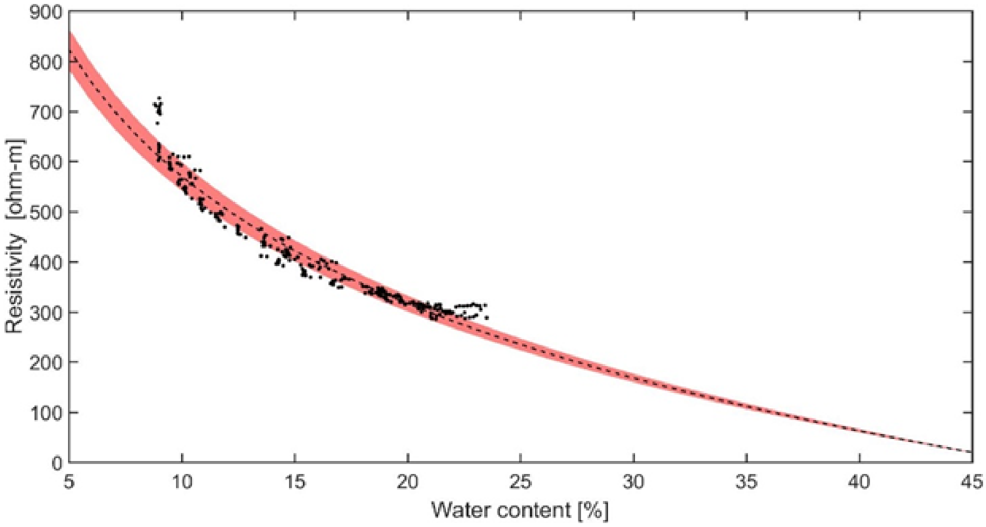
地電阻層析成像技術 (Electrical Resistivity Tomography, ERT) 是一種非破壞性的地球物理探勘方法，透過在地表佈設電極，施加電流並量測電位差，反演獲得地下不同深度與位置的電阻率分佈。該技術可解析數公尺至數十公尺深度範圍的地下電性結構，並以二維或三維影像的方式呈現面狀的資訊 (圖一)。相較於傳統僅能在單點安裝感測器的土壤監測方式，ERT 監測能提供大範圍、連續性的空間分佈資訊，顯著提升監測效能與解析度。

由於土壤電阻率與含水量之間通常存在反比關係 (Mazác *et al.*, 1985; Samouëlian *et al.*, 2005; Bery and Ismail, 2018; Kurtuluşa *et al.*, 2019)，因此 ERT 可用於推估區域尺度的土壤含水量變化 (Luo *et al.*, 2019; Vanella *et al.*, 2021; Rieder and Kneisel, 2023)。實務上，透過現地同步量測土壤含水量與地電阻率，可以建立兩者的經驗關係曲線 (圖二)，進而將電阻率影像轉換為含水量的空間分佈。

自然電位 (Self Potential, SP) 觀測技術則是一種被動式量測方法，主要量測地表不同位置間的自然電位差。其訊號來源與地下水流動、礦化作用以及地球化學反應等相關。在農業及水文應用中，SP 主要受地層滲透性與地下水流動勢影響。透過長期監測自然電位變化，可推估地下水在田間的流速與流向，進而輔助判斷灌溉水或降雨在土壤中的運移路徑，與 ERT 所提供的含水量分佈資訊形成互補。



圖一、利用 ERT 反演獲得的地下電阻率剖面圖，顯示淺層至約 15 m 深度的電阻率空間分佈。



圖二、現地量測所得的土壤電阻率與含水量關係曲線，紅色區域為回歸模型的不確定範圍。

5.2 土壤含水量、地溫及張力自動監測技術建立

為掌握農田水文條件及其時空變化，有必要建立農田尺度的水文監測資料庫，並與其他地球物理與環境監測技術結合，形成多元觀測系統。此系統不僅可提升 ERT 在水文研究中的應用，也能用於土壤參數獲取與灌溉管理等多元目的。為此，於現地測線上設置具自記功能的觀測站，長期監測土壤含水量、地溫及土壤張力等關鍵水文因子，確保資料具連續性與代表性，並為後續的水文分析提供基礎資料。

(1) 土壤含水量監測：

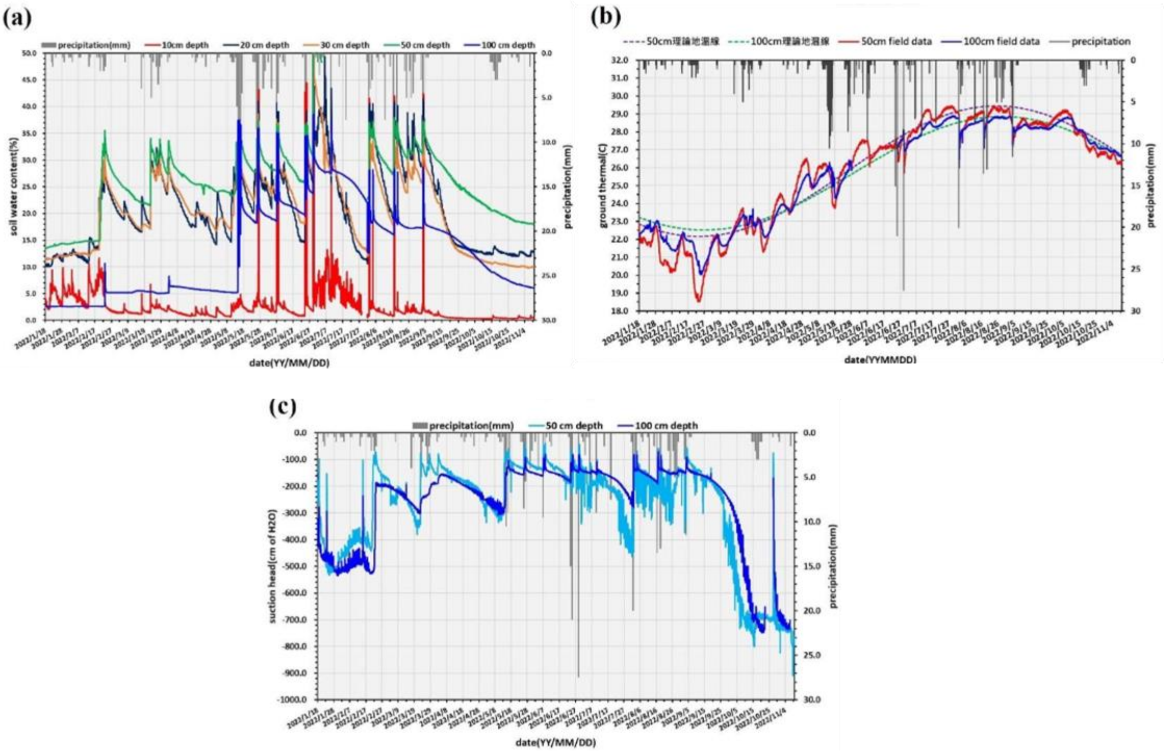
土壤含水量感測系統可在多個深度 (如 10、20、30、50 與 100 cm) 同時量測，並以高精度 (± 0.003% Vol.) 記錄地表下不同層位的含水量變化。感測器適用於 -20℃ 至 +75℃ 的操作環境，適合農田四季觀測。監測結果會與降水及灌溉紀錄比對，以分析不同深度含水量的補注與消耗特性 (圖三 (a))。透過此資料可評估降雨與灌溉對淺層與深層水分動態的影響，並為 ERT 所反映的電阻率變化提供實地驗證依據。

(2) 地溫監測：

地溫感測器量測範圍介於 -50℃ 至 +70℃，可在 -50℃ 至 +100℃ 的環境中工作，精度達 ± 0.2°C (0-70°C)。觀測深度通常設定於 50 cm 與 100 cm，以減少短期氣溫波動對數據的影響。藉由分析 1 個水文年的地溫變化曲線，可反推土壤的熱擴散係數，進一步了解土壤的導熱特性(圖三 (b))。此外，將實測曲線與理論地溫曲線進行比較，可檢驗模型假設與現地熱傳特性的一致性。

(3) 土壤張力監測：

土壤張力計由多孔陶瓷杯、塑膠管及真空壓力計組成，並配備電流轉換器以便自動化數據記錄。張力數據可反映土壤對水分的吸力大小，與含水量呈非線性關係。藉由分析張力與含水量的對應關係 (圖三 (c))，可用於推估保水曲線 (Soil Retention Curve, SRC) 的參數，進而作為模擬土壤入滲、蒸發及植物耗水等過程的基礎資料。

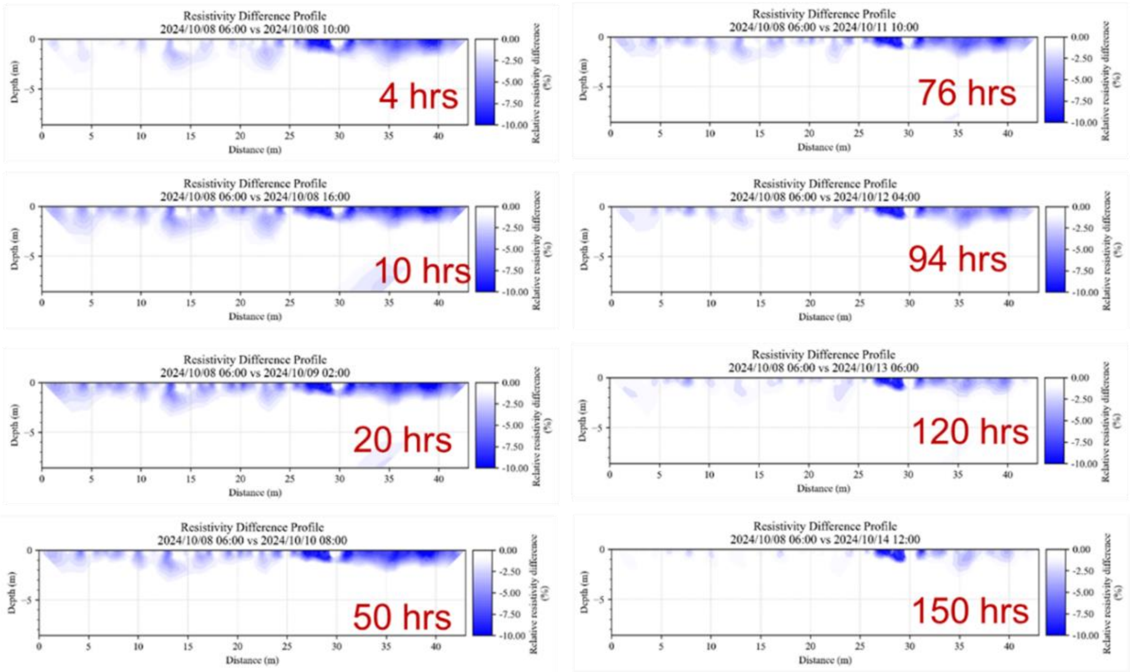


圖三、不同深度土壤監測參數隨時間變化：(a) 土壤含水量變化及與降水紀錄之對比；
(b) 50 cm 與 100 cm 深度之地溫觀測值 (實線) 與理論曲線 (虛線) 比較；
(c) 不同深度土壤張力變化曲線與降水事件之對應關係。

5.3 田間土壤含水量動態監測之應用與未來展望

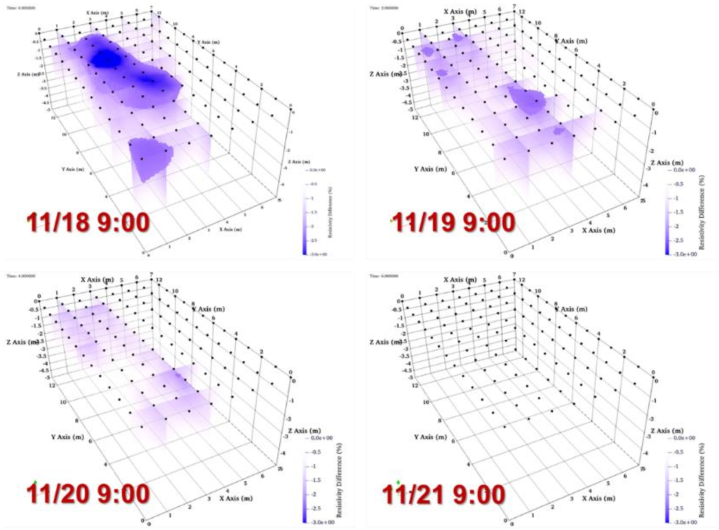
在灌溉或降雨事件中，ERT 可即時觀測水分入滲於土壤中的時空變化過程。分析方法通常先選取一組背景值，作為比較基準 (一般為灌溉或降雨前的電阻率剖面)，再計算各後續時間點相對於背景值的電阻率變化率。

圖四呈現 1 處水田 1 次灌溉事件後連續 2 至 150 小時的二維電阻率剖面差異，藍色區域代表電阻率下降，反映含水量增加的區域。觀測結果顯示，測線左側的電阻率較快回復至背景值，代表該區域入滲後的排水較快；而右側則回復緩慢，可能反映局部土壤滲透性較低或排水受阻，呈現場地內水分動態的空間差異。圖五展示另 1 處水田在 1 次灌溉後 4 日內的三維電阻率變化百分比分布。可以看到初期濕潤區集中分布於特定區域，隨時間推移逐漸縮小並回復至初始狀態。然而，不同位置的回復速度並不一致，顯示仍存在排水與滯水過程上的不均勻性，這對灌溉管理與農地改良策略制定具有重要參考價值。



圖四、灌溉後 2 至 150 小時的電阻率差異剖面圖，

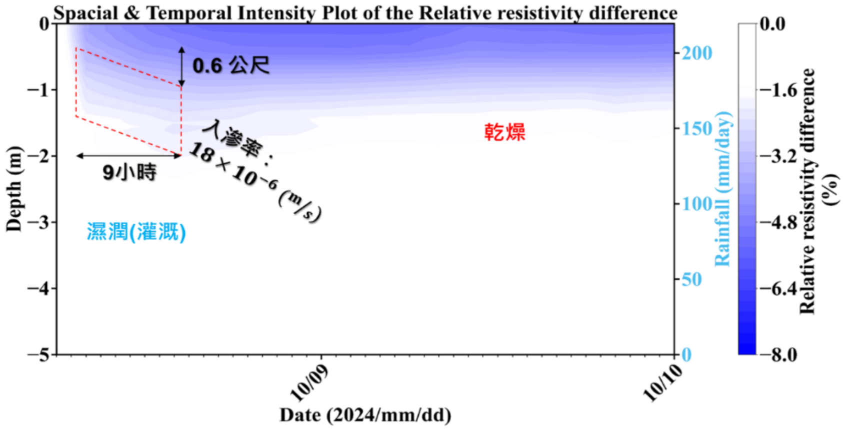
藍色區域表示電阻率下降，反映含水量增加。



圖五、灌溉後 4 日內的三維電阻率變化百分比分布，
顯示濕潤區域隨時間收縮與回復。

為進一步量化入滲速率，可將剖面變化沿垂直方向取一維深度-時間剖面 (圖六)，並計算其時空梯度。以本案例而言，於深度約 0.6 m 處觀測到的濕潤鋒在 9 小時內到達，推估平均入滲率約為 18×10^{-6} m/s。這種以 ERT 估算入滲率的方法，較傳統單點張力計或水分感測器更能捕捉空間變異性，並且在不破壞土壤結構的情況下提供評估。

隨著感測技術與資料處理能力的提升，ERT 與其他水文監測技術 (如土壤含水量、地溫、張力感測) 將可形成多元融合的監測系統，進一步改善入滲、滯留與排水特性的判斷精度。此外，透過即時資料傳輸與雲端運算，未來有望建立灌溉決策支援系統，即時回饋農田水分狀態，達到節水與精準農業的雙重目標。對於水資源管理、農田排水設計、地力保持及極端氣候下的農業韌性提升，這項技術都具有廣泛的應用潛力。



圖六、相對電阻率變化的一維深度-時間分布圖，並標示入滲率估算結果。